کاربرد استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپگر سه‌بعدی FDM
در مرمت و نمونه‌سازی از اشیاء تاریخی-فرهنگی ساخته شده از عاج

جلیل اسماعیل‌نژاد تیمورآبادی
دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکدهٔ حفاظت آثار فرهنگی
دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ایران

مهدی رازانی (نویسنده مسئول)[1]
دانشیار، عضو هیئت‌علمی، دانشکدهٔ حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز

1. M.razani@tabriziau.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از فناوری‌های نوین و روش‌های نگهداری از اشیای ساخته شده از عاج منجر به حفاظت بهتر و بی‌خطرتر از اشیاء شده است. هدف این مقاله امکان‌سنجی استفاده از روش‌های جدید فناوری نمونه‌سازی سریع ازجمله مدل‌سازی‌های سه‌بعدی و چاپگر سه‌بعدی FDM، جهت دستیابی به روش مناسب برای بازسازی بخش‌های مفقودی و ساخت مولاژ از اشیای عاجی با استفاده از تجهیزات موجود جهت به‌کارگیری آن در مرمت و بازسازی اشیاست. به منظور بررسی فناوری معرفی‌شده، یک مهرۀ شطرنج از جنس عاج که دارای مفقودی بسیار است انتخاب شد. مهرۀ مشابه نمونه، مرد شترسواری است که حکاکی ظریف و ریزی دارد و این مهره در مجموعه مهره‌های شطرنج موجود بود. از مهرۀ مشابه با آن مستندسازی انجام گرفت و با توجه به تصاویر موجود، مدل‌سازی سه‌بعدی با نرم‌افزار زی‌براش که نرم‌افزار مخصوص حجاری و مجسمه‌سازی است، انجام شد. مدل سه‌بعدی شده با فرمت STL ذخیره شد و در نرم‌افزار مدیریت چاپگر سه-بعدی Simplify3D در جهت مدیریت چاپ و تنظیم میزان ساپورت‌ها به صورت دستی و تبدیل به G-Code بارگذاری و سپس با نازل ۰/۳ نمونه چاپ شد. باتوجه به حجم زیاد مفقودی اثر انتخابی و عدم سوار شدن نمونۀ چاپ شده برروی بدنۀ اصلی اثر تاریخی، تصمیم بر این شد که از نمونۀ موجود مولاژ تهیه شود. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی با نرم‌افزار سه‌بعدی زی‌براش و چاپ با چاپگر سه‌بعدی FDM به عنوان روش مناسب در جهت ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقودی از اشیاء عاجی می‌تواند مفید واقع شود و همچنین می‌توان در بازسازی قسمت‌های مفقودی سایر اشیاء تاریخی-فرهنگی نیز مورد استفاده قرار بگیرد.

واژگان کلیدی: عاج، مدل‌سازی، حفاظت- مرمت، بازسازی سه‌بعدی، مولاژ، چاپگر سه بعدی

مقدمه

در گذشته، واژۀ عاج فقط به عاج فیل‌ها نسبت داده می‌شد. ساختار شیمیایی تمامی گونه‌های عاج مشابه یکدیگر هستند و تجارت دندان‌ها و عاج‌های متعلق به حیواناتی غیر از فیل به شکل گسترده‌ای در سراسر جهان رایج است. بنابراین واژۀ عاج را می‌توان برای دندان یا عاج هر پستانداری که کاربرد تجاری دارد و به‌اندازۀ کافی برای تراش و حکاکی بزرگ است، به کار برد (Baker, et al. 2020: 4). گونه عاج‌های حیوانی شامل فیل (آسیایی، آفریقایی)، ماموت، شیرماهی، نهنگ عنبر، گاوماهی، نهنگ دریایی، اسب آبی و گراز می‌شود. (Locke. 2013: 120) عاج‌های حیوانی به طور کلی شامل کریستال‌های هیدروکسی آپاتیت غنی شده با منیزیم است که در ماتریکسی از الیاف کلاژن نوع I تعبیه شده است (Cui. Wen. Zhang. MA. & Li. 1994). عاج و استخوان از نظر ساختار شیمیایی مشابه‌اند ولی از لحاظ ساختار فیزیکی تفاوت‌هایی با هم دارند. از استخوان عمدتاً برای دفاع و ابزار روزمره استفاده می‌شد و از عاج به دلیل دوام و ظاهر زیبایی آن که شامل رنگ، شفافیت و براقی سطح می‌شود، برای اهداف تزیینی استفاده می‌شد (Bisht. 2010: 84). از دیگر ویژگی‌های مهم عاج‌ها وجود خطوط شرگر در مقاطع عرضی عاج فیل و ماموت است. این خطوط اولین بار در سال ۱۸۴۵م به عنوان خطوط منحنی، متقاطع و لوزی توصیف شدند (Owen. 1856) اما در سال ۱۹۹۳میلادی از عبارت الگوی شرگر برای توصیف شکل‌های ریخت‌شناسی عاج به عنوان ابزاری برای تشخیص و شناسایی استفاده شد (Espinoza & Mann. 1993: 35). شناسایی عاج‌ها و تفکیک گونه‌های آن در حفاظت و مرمت، باستان‌سنجی و علوم باستان-شناختی مفید است. ساختارشناسی و شناسایی اشیای ساخته شده از عاج موجب فهم مبادلات و تجارت در دوره‌های تاریخی و پیشاتاریخ می‌شود، به علاوه به درک فناوری‌های ساخت و فرآوری اشیاء در دوره‌های باستانی و شناسایی ارزش‌های مادی، معنوی و نمادین اینگونه آثار کمک شایانی می‌کند.

شناسایی انواع عاج در مباحث حقوقی و قضایی که اتفاقاً از رویکردهای باستان‌سنجی‌ست، بسیار مهم است. این رویکرد مبتنی بر شناسایی سره از ناسره و تشخیص جعل در آثار تقلبی و بدلی است.

اشیای عاجی فراوان به دست آمده از کاوش‌های باستان‌شناختی که روند اکتشاف آن‌ها همچنان ادامه دارد، حاکی از استفاده از عاج در حوزه‌های مختلف فرهنگ، هنر و صنایع‌دستی است. محبوبیت استفاده از اشیای عاجی و تقاضای زیاد ناشی از آن، باعث به خطر افتادن و انقراض برخی گونه‌های حیوانی، به‌ویژه فیل شده است؛ درنتیجۀ کاهش جمعیت تعداد فیل‌ها، در سال ۱۹۸۹ کنوانسیون تجارت بین‌المللی گونه‌های در معرض خطر (CITES)[1]، تجارت عاج را ممنوع اعلام می‌کند (Stiles.

1.Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora

2004) و باتوجه به محدود شدن منابع عاج، استفاده از آن علاوه بر غیرقانونی بودن از نظر اخلاقی نیز توجیهی ندارد (Ratha, et al. 2021). لذا برای حفظ و بازسازی قسمت‌های مفقودی اشیای تاریخی-فرهنگی که از عاج تراشیده شده‌اند، معمولاً از مواد جایگزینی همچون عاج‌سان‌های گیاهی مانند درخت نخل تاگوا یا دانۀ جارینا (Chu, et al. 2015) مواد طبیعی همچون استخوان، مواد کامپوزیت پلیمری با ذرات معدنی، کازئین و خاک ارۀ عاج (Baker, et al. 2020: 56-62) و مواد دیگری همچون گچ، موم و غیره استفاده می کنند. باتوجه به ساختار حساس عاج و حکاکی‌های ظریفی که روی آن انجام می گیرد، استفاده از مواد جایگزین و حکاکی بر روی آن کار بسیار زمان‌بری است و ممکن است به اشتباهات مرمتی نیز منجر شود. لذا استفاده از روشی که کمترین مداخلۀ مرمتگر با دقت بالا در کمترین زمان را داشته باشد و بتواند با فناوری‌های سه‌بعدی پردازش شود، می‌تواند جایگزین مناسبی باشد. با استفاده از این فناوری-ها می‌توان سبک هنرمند اصلی را بازیابی و ظاهر یک اثر هنری را دقیقاً همانطور که در نظر گرفته شده، حفظ کرد. فناوری‌های سه‌بعدی ابزاری مناسب برای نمایش سه‌بعدی اشیاء به‌صورت مجازی، بازسازی قسمت‌های مفقود و ساخت مولاژ از مصنوعات فرهنگی و تاریخی برای اهداف حفاظتی در علوم میراث فرهنگی و باستان‌شناختی را دارند (Fantini, et al. 2008). در این مقاله برای مدل‌سازی سه‌بعدی از نرم‌افزار ZBrush و برای نمونه‌سازی از چاپگر سه‌بعدی FDM که متداول‌ترین نوع چاپگر سه‌بعدی در ایران و جهان است استفاده شده است. روش کار این چاپگر مبتنی بر لایه‌گذاری مذاب است که می‌تواند عملیات چاپ سه‌بعدی را تا حداقل ضخامت لایه ۱۰۰ میکرون انجام دهد (رازانی و دیگران ۱۳۹۷).

اهمیت و ضرورت تحقیق

هدف از این تحقیق، استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپگر سه‌بعدی در جهت ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقودی از اشیای تاریخی-فرهنگی عاجی و امکان‌سنجی به کارگیری روش‌های مذکور جهت بازسازی دیگر اشیاست.

پرسش‌های پژوهش

مهمترین پرسش‌هایی که این پژوهش براساس آنها شکل گرفته ، عبارتند از: چگونه می‌توان از مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپگر سه‌بعدی FDM [1] در ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقود برای اشیای عاجی

1. Fused Deposition Mode

تاریخی- فرهنگی استفاده کرد؟ و بازسازی بخش‌های مفقودی و نمونه‌سازی برای اشیای عاجی با استفاده از روش‌های مذکور چه مزایا و معایبی نسبت به روش‌های معمول دارد؟

روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش به‌صورت کتابخانه‌ای، تجربی-آزمایشی و تحلیلی است؛ به منظور انجام دادن پژوهش ابتدا مدارک منتشر شده و اسناد کتابخانه‌ای جهت مرور ادبیات نوشتاری و تجربی حوزۀ مطالعاتی بررسی شده است. در بخش مطالعۀ ادبیات تحقیق، با بررسی منابع کتابخانه‌ای به شناخت و بررسی روش‌های مرسوم بازسازی اشیای عاجی پرداخته شده و بهترین روش مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپ سه‌بعدی برای بازسازی قسمت‌های مفقود و ساخت مولاژ از اشیای تاریخی-فرهنگی مشخص گردیده است. در مرحلۀ تجربی-آزمایشگاهی تمامی سطح نمونۀ مطالعاتی را تبدیل به مدل‌های رایانه‌ای کردیم؛ سپس با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی، از سطح نمونۀ اثر نقشه‌های سه‌بعدی تهیه شد و در ادامه، این نقشه‌ها به داده‌های قابل استفاده برای چاپگر سه‌بعدی تبدیل شد که با اجرای آزمون‌های عملی و هم‌سنجی سیستم‌ها، حجم سه‌بعدی مولاژ چاپ گردید. در نهایت پس از انجام تمامی مراحل یاد شده و با تحلیل مزایا و معایب نتایج و فرآیند فوق در قالب یافته‌های پژوهش به پرسش‌های تحقیق پاسخ داده شده است.

روش‌های مرسوم بازسازی اشیای عاجی در ایران و جهان

از عاج و استخوان در طول تاریخ برای بسیاری از اشیای هنری، مذهبی و اشیاء روزمره استفاده می‌شده است. عاج به دلیل ظاهر زیبایی‌شناختی، کارایی راحت و دوام بالا حکاکی شده و مورد استفاده قرار می‌گرفت. از سال ۱۹۸۹ که قانون ممنوعیت تجارت عاج از سوی کنوانسیون تجارت بین‌المللی گونه‌های در معرض خطر انقراض جانوران و گیاهان (CITES) وضع شده است (Stiles. 2004)، بسیاری از مواد طبیعی و مصنوعی به‌منزلۀ جایگزین‌های عاج (Locke, M. 2008)(Baker, et al. 56-59)که به عاج‌سان‌ها معروف هستند معرفی شدند. هنرمندانی که روی اشیای هنری از جنس عاج کار می‌کنند، معمولاً با استفاده از ترکیب‌های حکاکی و کنده‌کاری، اره کردن، تراشکاری، حکاکی و قلمزنی، جلا دادن و رنگ‌آمیزی، از نظر فرم ترکیبات پیچیده‌ای را به‌وجود می‌آورند (Bisht 2010:100-104). ساختار فیزیکی عاج به‌گونه‌ای است که به‌راحتی لکه برمی‌دارد و چرک می‌شود؛ لذا برای جلوگیری از لک شدن سطح، هنگام کار با مواد عاجی باید دستکش نخی پوشید (Robert & Faltermeier 2014: 59). این ویژگی عاج، مرمت و بازسازی قسمت‌های مفقودی و دارای ترک را دشواتر می‌کند. معمولاً مرمت عاج‌های شکسته را با رزین اپوکسی و گچ انجام می‌دهند. در

مواردی که ترک‌های سطح عاج زیاد باشد، چسب PVAC را در آب حل کرده و روی عاج یا استخوان اعمال می‌کنند. برخی از مرمتگران آثار تاریخی، استفاده از روغن بادام را هم مفید دانسته‌اند (Bisht 2010: 124-127). برای حفظ و زیبایی اثر تاریخی، ترک‌خوردگی‌های روی آن را به‌راحتی می‌توان برطرف کرد. همچنین برخی از ترک‌ها را می‌توان به کمک بتونه‌های مناسب پر کرد. این بتونه‌ها، با رنگی هماهنگ با رنگ اثر آغشته شده و روی سطح آسیب‌دیده پخش می‌شوند (Robert & Faltermeier 2014, 57). ترک‌های موجود روی مجسمهٔ عاجی مسیح که متعلق به آکادمی سلطنتی هنرهای زیبای فرناندو بود، با بتونهٔ اپوکسی Milliput® Superfine White که بافت و رنگ پایهٔ مناسبی دارد، مرمت شد. برای بازسازی قسمت مفقود انگشتان دست راست پیکرهٔ مسیح با ریخته‌گری سیلیکونی قالبی ساخته شده و با رزین پی‌یورتان (که از نظر رنگ بسیار شبیه به خود عاج است)، قطعات مفقودی بازسازی گردید (شکل ۱) (Alconada, 2017).

در گزارش دیگری که مربوط به فیگور یک نمونهٔ سوارکار اسب در موزهٔ باستان‌شناسی، بخش عصر مدرن موزهٔ ملی اسپانیا است، برای بازسازی بخش‌های مفقود در قسمت سُم، با استفاده ریخته‌گری سلیکونی قالب گرفته شد و طرح مورد نظر با دوغاب گچی ساخته شد (شکل ۲) (Museo Arqueológi-co Nacional, 2018). تکنیک‌های متعددی برای بازسازی قسمت‌های مفقود اشیای عاجی وجود دارد. برای این کار، عاج مصنوعی یا طبیعی را با استفاده از چسب‌های طبیعی Mowilith DVD به قسمت‌های جداشده الصاق می‌کنند، از ترکیب پلی وینیل استات با pH کمتر از ۶ نیز می‌توان استفاده کرد (اگر اسید زیادی در این ترکیب وجود داشته باشد، آسیب‌های غیرقابل جبرانی به شیء وارد می‌شود). همچنین قانونی کلی برای مرمت عاج وجود دارد و آن این است که قسمت مرمتی باید از فاصله ۳ اینچی مشاهده شود ولی در فاصله ۱۸۰cm (۶ فوت) قابل‌مشاهده نباشد (Bisht, 2010: 124-127). در جدیدترین پژوهش‌ها در مورد بازسازی عاج، مادهٔ جایگزین پیشرفته‌ای بنام دیگوری[1] ساخته شده که از نظر رنگ، شفافیت و براق بودنِ سطح همانند ویژگی‌های زیبایی‌شناختی عاج است (Ratha, et al, 2021).



■ شکل ۱: راست– قبل و بعد از مرمت مجسمه مسیح، چپ– بازسازی انگشتان ست راست (Alconada, 2017).

1. Digory

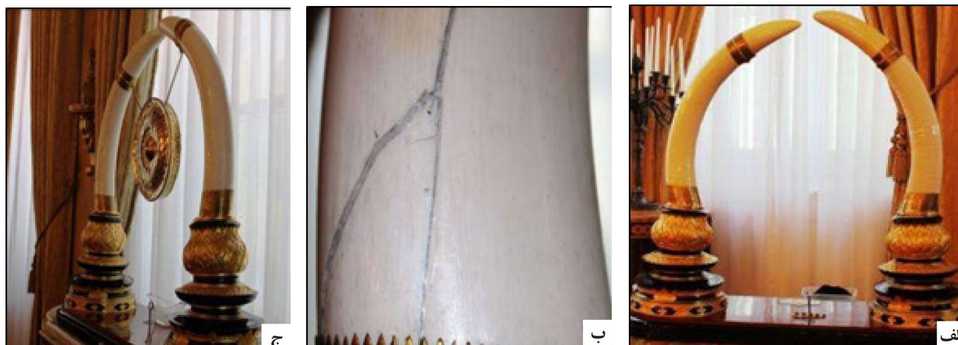


■ شکل۲: الف– پیکرۀ مجسمه قبل از مداخلات، ب–جدا کردن مرمت‌های قبلی و ج– بازسازی سمت سم (Museo Arqueológico Nacional, 2018)

در ایران نیز نمونه‌هایی از مرمت عاج با گچ و رزین انجام‌شده است. در ویترین موزۀ ملی ایران یک نمونه پیکرۀ عاجی به شکل گاو شاخ‌دار قرار داشت (شکل۳). قسمت‌هایی از این اثر دچار مفقودی بود که به نظر می‌رسید با ماده‌ای شبیه به پلی‌استر بازسازی‌شده است. بر روی این ماده از لحاظ بصری و مبانی مرمتی، موزون‌سازی صحیحی انجام‌نشده بود و هیچ گونه شباهت رنگی با بدنۀ عاج نداشت. در متن مصاحبه‌ای که با ریاست وقت موزۀ ملی ایران انجام گرفت، بیان شده که اثر با گچ بازسازی و موزون‌سازی شده است و در بازنگری‌های بعدی موزون‌سازی‌های رنگی، پاک شده و پس از آن سطوح، بازسازی و با استفاده از آبرنگ با بدنۀ عاج، همگون‌سازیِ رنگی شده است (عبدالله خان گرجی، ۱۴۰۰). قسمت‌های ترک‌خوردۀ موجود روی دو نمونه عاج فیل موجود در کاخ موزۀ ملت کاخ سعدآباد با استفاده از موم کریستال ترمیم شده‌اند (شکل۴) (آرشیو کاخ موزه سعدآباد، بی‌تا). همچنین در پایان‌نامه‌ای با عنوان بررسی ساختاری آثار عاج کنده کاری شدۀ پیش از تاریخ، برای پر کردن درز شکاف‌ها و ترک‌ها و قسمت‌های مفقودی، از پرکننده‌ای به نام Glass Micro Balaon و از پریمال به عنوان بست استفاده شد (نیک نام، ۱۳۹۰).



■ شکل۳: نمایی از دو طرف پیکرۀ گاو شاخ‌دار عاجی بازسازی‌شده با گچ (مأخذ: بایگانی شخصی مهدی رازانی، ۱۳۹۹).



■ شکل ۴: الف– نمونۀ عاج‌ها قبل از مرمت، ب– پر کردن درز ترک‌ها با موم میکرو کریستال گرم شده، ج– وضعیت کنونی اثر (مأخذ: بایگانی کاخ موزۀ سعدآباد بی‌تا).

٦- پیشینۀ استفاده از فناوری‌های نوین سه‌بعدی در حفاظت و مرمت میراث فرهنگی

در این مقاله، پیشینۀ استفاده از فناوری‌های نوین سه‌بعدی در حفاظت و مرمت میراث فرهنگی شامل دو بخش می‌شود. بخش اول شیوه‌های مدل‌سازی سه‌بعدی با استفاده از تکنیک‌ها، ابزارها و نرم‌افزارهای سه‌بعدی‌ساز است و بخش دوم تلفیق استفاده از مدل سه‌بعدی تهیه شده با چاپگر سه‌بعدی و نمونه‌سازی را در بر می گیرد.

بخش اول:

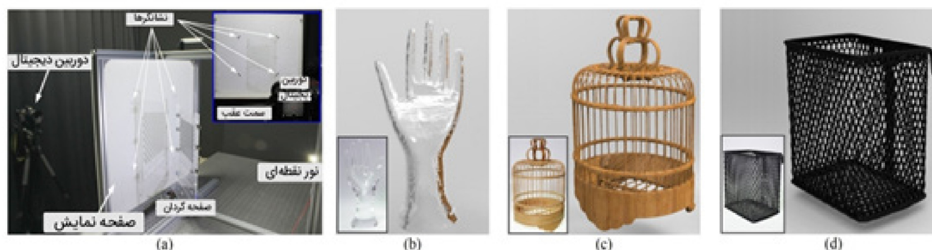
امروزه استفاده از فناوری‌های روز، تحولات شگرفی در زمینه‌های مختلف به‌وجود آورده است. در زمینۀ علوم میراث فرهنگی نیز این فناوری‌ها باعث بهبود و افزایش دقت در مراحل کار شده است. ازاین‌رو از مدل‌سازی سه‌بعدی در زمینه‌های مختلف همچون مرمت بناهای تاریخی (نیکنامی و میراشه، ۱۳۸۴)، محوطه‌های باستان‌شناسی (Spencer. 2008)، مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی (رازانی و دیگران، ۱۳۹۵) و ایجاد موزه‌های مجازی (Styliani et al, 2009) استفاده شده است. سه‌بعدی‌سازی به‌عنوان بخشی از حوزۀ وسیع گرافیک کامپیوتری، پدیده‌ای است که به ارائۀ شبیه‌سازی ریاضی سطوح در یک ساختار هندسی-فضایی می‌پردازد. تمامی فناوری‌های سه‌بعدی‌سازی، ازجمله روش‌های دیجیتالی گرافیک کامپیوتری فضایی، که ما با آن‌ها در ارتباط هستیم می‌توانند در این دو بخش قرار گیرند: بخش نرم‌افزار (مدل‌سازهای سه‌بعدی، نمایش‌دهنده‌های سه‌بعدی) و بخش سخت‌افزار (اسکنرهای

سه‌بعدی، چاپگرهای سه‌بعدی) که هدف آن‌ها بهبود ارتباط میان آثار و یا فهم بصری از برخی فرآیندها است. روش‌های سه‌بعدی‌سازی در یک دههٔ گذشته، پیشرفت چشمگیر داشته‌اند و تحقیق در مورد آن‌ها فرصت‌های متفاوتی درزمینهٔ میراث فرهنگی به وجود آورده است (رازانی و دیگران، ۱۳۹۷).

از اسکنر سه‌بعدی و ساخت تصاویر دیجیتالی در حوزهٔ میراث فرهنگی استفادهٔ بسیاری شده است. در حال حاضر این فناوری در جهت مستند کردن آثار هنری کاربرد دارد. پروژهٔ سه‌بعدی‌سازی مجسمهٔ میکل آنژ پیشگام سه‌بعدی‌سازی در حوزهٔ میراث فرهنگی است (Scopigno, et al., 2011) و در پروژهٔ سه‌بعدی‌سازی مجسمهٔ مینروا نشان داده شد که تکنیک‌های سه‌بعدی‌سازی با استفاده از اسکنرهای سه‌بعدی کمک شایانی به بهبود روش‌های سنتی مرمت می‌کند (Rocchini, Cignoni, Montani, & Pingi, 2011). استفاده از ترکیب اسکنر سه‌بعدی و نرم‌افزارهای مدل-سازی، برای ایجاد مدل سه‌بعدی از اشیای پیچیده و ظریف کاربرد دارد. برای انجام پروژهٔ مجسمهٔ مدونا که ظرافت و پیچیدگی زیادی دارد، از فناوری‌های ترکیبی شامل توموگرافی، اسکن سه‌بعدی و مدل‌سازی با نرم‌افزار Geomagic Studio استفاده شد (Koska, 2011).

از دیگر روش‌های مدل‌سازی سه‌بعدی، فوتوگرامتری برد کوتاه است. برای انجام دادن این روش، یک دوربین رفلکس دیجیتال تک لنز باکیفیت بالا و با وضوح تصویر خوب مورد نیاز است. بارو و دیگران (۲۰۱۴) این روش را برای بازسازی قطعات سرامیک به‌کار بردند. آن‌ها از دوربین SLR دیجیتال Nikon D۶۰ برای عکاسی قطعات مختلف سرامیک استفاده کردند. در این فرایند، نورهای مورد استفاده باید یکنواخت و دارای کنتراست یکسان باشند، فاصلهٔ دوربین تا اثر باید ثابت نگه‌داشته شود، دوربین روی دایره‌ای فرضی به دور اثر بچرخد و از تمامی قسمت‌های اثر، عکس‌هایی باکیفیت بالا ثبت کند. در پژوهش یاد شده از نرم‌افزار Agisoft PhotoScan جهت مدل‌سازی سه‌بعدی و از نرم‌افزار MeshLab جهت مقیاس و محاسبهٔ حجم استفاده شده است (Barreau, et al., 2014).

مدل‌سازی سه‌بعدی اشیای بسیار پیچیده از قبیل اجسامی که ساختارهای مشبک دارند یا از مواد نیمه‌شفاف ساخته‌شده‌-اند، کار چالش‌برانگیزی است. بازسازی این نوع از اشیای پیچیده با استفاده از سایه انداختن‌های مسطح انجام می‌شود (شکل۵)(Lin, Chang, & Hu, 2013). در ادبیات رایانه‌ای، اشیایی که شبیه به کنده‌کاری‌ها و حکاکی‌های روی عاج هستند، معمولاً اشیای پیچیده و یا فیلیگرانی نام دارند (Chen, et al. 2016).



■شکل۵: (a) سیستم پیشنهادی برای گرفتن تصاویر سه‌بعدی با استفاده از یک صفحهٔ شطرنجی نیمه‌شفاف. مقایسهٔ نتایج بازسازی سهبعدی با اشیای واقعی نشان داده شده است: (b) ماکت دست از جنس اکریلیک نیمه‌شفاف، (c) قفس چوبی، (d) جاقلمی فلزی (مأخذ: Lin, Chang & Hu, 2013).

علاوه بر روش بازسازی اشیای پیچیده با سایه انداختن‌های مسطح که پیش‌تر به آن اشاره شد، چن و همکاران (۲۰۰۸) روش دیگری در مقاله‌ای ارائه کرده‌اند. آن‌ها در این روش نشان دادند که حکاکی‌های سه‌بعدی را می‌توان با برون‌یابی خطوط و منحنی‌ها از نقشه‌های خطی با استفاده از تشخیص لبه و الگوریتم‌های خط اسکن روی تصاویر به دست آورد. در این پژوهش فناوری اسکن CT به‌عنوان تکنیکی برای بررسی‌های مصنوعات حکاکی‌شدهٔ عاجی پیشنهاد شده است (Chena, et al. 2008).

در موزهٔ ریودوژانیرو برزیل به‌منظور تحکیم روابط تاریخی برزیل با شرق، نمایشگاهی از عاج برگزار شد و دو نمونه اثر عاجی (یک مجسمه و یک کشتی)، برای مدل‌سازی سه‌بعدی انتخاب شدند. سطح براق اشیایی مانند عاج، معمولاً هنگام استفاده از تکنیک‌های سه‌بعدی مرسوم برای گرفتن سطح، مشکلاتی ایجاد می‌کند. در اسکنرهای سه‌بعدی همانند اسکنرهای نور سفید و لیزری، انکسار نور از سطوح براق ایجاد می‌شود. همچنین اشیاء با تزیینات و جزییات زیاد با استفاده از اسکن یا فوتوگرامتری نمی‌توانند به‌درستی بازسازی شوند. در این پژوهش رویکردی که برای مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده شد، ترکیبی از چند روش بود. برای مدل مجسمه فرآیند ساده‌تری انجام گرفت؛ مدل‌سازی با اسکن لیزری Minolta Vivid 9i دیجیتالی انجام شد و بافت‌سازی با استفاده از مجموعه‌ای شامل ۱۵ عکس به‌انجام رسید، اما اسکن لیزری برای مدل‌سازی کشتی چینی قادر به ثبت جزییات دقیق ساختار و پانل‌ها نبود و بنابراین مورد استفاده قرار نگرفت. برای این منظور از ترکیب هندسی بر اساس عکس‌های دیجیتال با توجه به محدودیت‌های موجود استفاده شد. از این‌رو ابتدا ساختار اصلی کشتی با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی سنتی، مانند اکستروژن، تقسیم‌بندی، دستکاری صورت و لبه انجام گرفت؛ سپس با استفاده از نرم‌افزار Blender مدل‌سازی شد. به همین ترتیب سایر اشیای تزیینی موجود در کشتی به‌جز پانل‌ها و پنجره‌ها که پیچیده بودند، مدل‌سازی شدند. ساختار شکنندهٔ کشتی چینی به‌گونه‌ای بود که اجازه

هیچ‌گونه دست‌کاری در قطعات ازجمله باز یا بسته کردن پنجره‌ها، یا حتی قرار دادن پس‌زمینهٔ ثابت پشت پنجره‌ها برای تسهیل بازسازی آن را نمی‌داد. اسکنر سه‌بعدی موجود نیز رزولوشن کافی برای سه‌بعدی‌سازی آن نداشت. روش فوتوگرامتری هم نتوانست مدل‌سازی دقیقی را انجام دهد؛ لذا از رویکردی متفاوت برای این کار استفاده شد. در ابتدا تصویری از نمای روبه‌رویی هر پنجره گرفته شد تا آن را برای فرآیند بازسازی آماده کند. برای این کار، تصویر برش داده و پرسپکتیو آن تصحیح گردید و در ضمن پیش‌زمینه نیز با استفاده از نرم‌افزار Gimp از پس‌زمینه جدا شد. بر اساس کار Lengyel یک تصویر رایانه‌ای سه‌بعدی از پنجره‌ها باکیفیت بصری بالا و با ساختار لایه‌لایه با استفاده از مجموعه‌ای از لایه‌ها، تولید شد. این نتیجه با اجرای چند مرحله به‌دست آمد: ۱- ایجاد یک نقشهٔ باینری با اطلاعات پس‌زمینه‌ای تا بافت اثر بتواند حاوی یک کانال آلفا باشد و مناطق شفاف را به‌درستی نمایش دهد. ۲- ایجاد یک نقشهٔ معمولی با تصویر رنگی ۳- ایجاد یک چهارگوش هندسی ۴- ترسیم نقشهٔ بافت و خواص مواد ۵- پیکربندی ضخامت پنجره‌ها با روی هم قرار دادن چندین نسخه. برش‌های متعدد چهارتایی روی‌هم چیده شدند تا حس یک حجم را ایجاد کنند (Marroquim, et al. 2017).

در زمینهٔ استفاده از اسکن و ساخت تصاویر سه‌بعدی در ایران اقداماتی در ارگ بم، تخت جمشید، مقبرهٔ کوروش در پاسارگاد، چغازنبیل، کلیساهای ارامنهٔ جلفا، تخت سلیمان تکاب، بیستون کرمانشاه و برخی دیگر از بناهای مهم ایران صورت گرفته است؛ همچنین اخیراً در مورد کاربرد اسکن و مدل‌سازی سه‌بعدی در ایران، روی سه نمونه اثر تاریخی مقالاتی ارائه‌شده است. علاوه بر این، دو نمونهٔ اسکن سه‌بعدی روی شیشهٔ تاریخی (رازانی و دیگران، ۱۳۹۵) (بهرام پور و کریمی، ۱۳۹۵) و یک نمونه روی یک سفال تاریخی انجام‌گرفته است (رازانی و دیگران، ۱۳۹۷).

بخش دوم:

تجربهٔ استفادهٔ تلفیقی از فناوری‌های اسکنر و چاپگر سه‌بعدی برای ایجاد تصاویر سه‌بعدی مجازی، بازسازی قطعات مفقود اشیای تاریخی-فرهنگی و همچنین ساخت مدل رایانه‌ای از آن‌ها چندان متداول نیست. در موزهٔ ملی اسلوونی، یک نمونهٔ مدل‌سازی از ظرف چینی با استفاده از تلفیق اسکنر و چاپگر سه‌بعدی انجام گرفت. در این پروژه ابتدا اثر با استفاده از اسکنر لیزری اسکن شد و سپس بازسازی دیجیتال قطعات مفقودی انجام گرفت و قطعات با چاپگر سه‌بعدی چاپ شدند. قبل از اتصال قطعات چاپ‌شده روی اثر، سطح اثر قطعات چاپ‌شده به دلیل خشن بودن سطح و شباهت کمی که با اصل اثر داشت سمباده‌زنی شد و پس از آن قطعات جداگانه، با رزین اپوکسی روی اثر اصلی چسبانده شدند

(Antlej, et al. 2012).

آراباس و همکاران با استفاده از فناوری‌های نوین نمونه‌سازی سریع، مجسمهٔ سفالی مدونا پیترانیکو را که در زلزلهٔ سال ۲۰۰۹ به‌شدت آسیب‌دیده و تکه‌تکه شده بود، بازسازی کردند. در این پروژه ابتدا قسمت‌های موجود با اسکنر، اسکن شد و سپس در نرم‌افزارهای سه‌بعدی مجسمه را مونتاژ کردند تا قسمت‌های مفقود مشخص شود. این قسمت‌ها در نرم‌افزار Meshlab بازسازی و سپس چاپ شدند (Arbace, et al. 2012). باروئا و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از تکنیک فوتوگرامتری که فقط قطعاتی از آن موجود بود، توانستند قسمت‌های مفقود را مدل‌سازی کنند. در این پروژه با استفاده از چاپگر سه‌بعدی مدل MarkerBot Replicator 2x قسمت‌های مفقود با فیلامنت ABS[1] چاپ‌شده و قطعات اصلی بر روی قسمت بازسازی‌شده نصب شدند (Barreau, et al. 2014). شیلینگ و همکاران با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی توموگرافی رایانه‌ای و استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی اقدام به احیاء و بازسازی مجازی ستون مهره‌های گونه‌ای از دایناسور کردند (Schilling, et al. 2013). مقالاتی از استفادهٔ تلفیقی مدل‌سازی و چاپگرهای سه‌بعدی در ایران نیز منتشرشده است. در مقاله‌ای بر روی یک نمونهٔ شیشه‌ای دارای نقوش برجسته که بخشی از آن مفقود بود، با کمک اسکنر لیزری نقشه‌سه‌بعدی از سطح نمونه تهیه و به داده‌های قابل‌استفاده برای چاپگرهای سه‌بعدی تبدیل شد تا قسمت‌های مفقود، چاپ و بر روی شیشه اصلی وصل شوند (رازانی و دیگران، ۱۳۹۵) همچنین در پژوهشی با موضوع شیشه‌ای تاریخی، از اسکنر و چاپگر سه‌بعدی برای بازسازی قسمت مفقود استفاده شد (بهرام پور و کریمی، ۱۳۹۵). در جدیدترین مطالعات انتشاریافته در زمینهٔ استفاده از روش‌های مدل‌سازی نوین در بازسازی اشیا، رازانی و همکاران در مورد بازسازی بخش‌های مفقودِ سفالینه‌های باستان‌شناسی، پژوهشی انجام داده‌اند. در این پژوهش از اسکنر و چاپگر سه‌بعدی جهت بازسازی قسمت‌های مفقود سفال‌ها استفاده‌شده است (رازانی و دیگران، ۱۳۹۷).

۷- مواد، تجهیزات و روش‌های مورد استفاده برای ساخت مولاژ

۷-۱- معرفی نمونهٔ مورد مطالعه

اثر مورد مطالعه (شکل۶) یک نمونه مهرهٔ شطرنج از جنس عاج بوده و متعلق به مؤسسهٔ فرهنگی موزه‌های بنیاد است. این مهره درون جعبه‌ای قرار دارد که تعداد مهره‌های موجود در آن ۳۲ عدد است که شامل چهار

1 . Acrylonitrile Butadiene Styrene

مهرهٔ اسب هم‌اندازه و چهار مهرهٔ فیل، چهار مهرهٔ شتر، ۱۶ مهرهٔ سرباز که همگی به رنگ سفید هستند و مهرهٔ سیاهی وجود ندارد. در این میان سه نمونه مهرهٔ شتر وجود دارد و یک مهره که فقط پایهٔ آن موجود است و قسمت‌های اصلی آن مفقود شده است و با توجه به کامل بودن سایر مهره‌ها این احتمال وجود دارد که متعلق به مهرهٔ شتر باشد (شکل۷). مشابه همین مهره‌های شطرنج در موزهٔ عاج رامسر نیز موجود است (شکل۸). برای مرمت و بازسازی این اثر تصمیم بر آن شد که ابتدا از تمامی زوایا مستندنگاری شود (شکل۹) و از نمونه مهرهٔ مشابه سالم، مولاژ تهیه شود و به جای نمونهٔ دارای مفقودی قرار بگیرد. در تعریف مولاژ به سادگی می‌توان گفت: مولاژ همان کپی است با این تفاوت که در مولاژ الزامی به ساخت اثر از جنس خودش وجود ندارد و تنها به شکل، اندازه، فرم، رنگ و نقش اکتفا می‌شود (رازانی و دیگران، ۱۳۸۹).





■ شکل۶: اثر مورد مطالعه (مأخذ: بایگانی مؤسسهٔ فرهنگی موزه‌های بنیاد).مه‌شفاف، (c) قفس چوبی، (d) جاقلمی فلزی (مأخذ: Lin, Chang & Hu, 2013).

■ شکل۷: اثر دارای مفقودی (مأخذ: همان).







■ شکل۹: مستندنگاری از اثر سالم (مأخذ: نگارندگان).

■ شکل۸: سمت راست مهره‌های شطرنج ۴۶۸۵۳ در موزهٔ عاج رامسر (مأخذ: همان).

۲-۷- نرم‌افزارهای سه‌بعدی‌سازی و مدیریت تنظیمات چاپ

برای این کار ابتدا از تمامی زوایای اثر مورد نظر تصاویر باکیفیت گرفته می‌شود و برای مدل‌سازی اثر نرم‌افزارهای سه‌بعدی به‌کار می‌رود. در این پژوهش با توجه به مجسمه بودن اثر و همچنین دارا بودن جزییات بسیار زیاد نسبت به‌اندازه شیء از نرم‌افزار زیبراش با نسخه ۱.۷.۲۰۲۱ استفاده گردید؛ زی‌براش یک ابزار مجسمه‌سازی دیجیتالی ترکیبی از مدل‌سازی، نقاشی دو بعدی و 2,5D و 3D است. این نرم‌افزار از فناوری اختصاصی Pixol استفاده می‌کند که اطلاعات مربوط به روشنایی، رنگ، مواد

و عمق را بر روی صفحهٔ نمایش ذخیره می‌کند. این سیستم در دسته نرم‌افزارهای مدل‌سازی سه-بعدی قرار می‌گیرد، با این تفاوت که برخلاف دیگر نرم‌افزارها که طراحی گرافیکی پیکسلی دارند، یک نرم‌افزار طراحی گرافیکی بُرداری یا وکتور است. در نرم‌افزارهایی که طراحی گرافیکی وکتور دارند، اساس کار بر پایهٔ معادلات و اصول ریاضی است و هنرمندان با استفاده از تکنیک‌های مجسمه‌سازی، در مقیاس دیجیتالی، مجسمه‌سازی سه‌بعدی را انجام می‌دهند. این نرم‌افزار دقت بالایی دارد و به‌خوبی، فرمت‌های خروجی تولید شده از سوی نرم‌افزارهای دیگر را می‌پذیرد. برای نمایش مدل سه‌بعدی، رندر گرفته می‌شود. رندر در نرم‌افزار Autodesk 3ds Max دارای نسخه ۲۰۲۲ که موتور رندر کرونا نسخه ۷ بر روی آن نصب‌شده بود، گرفته می‌شود. همچنین جهت مدیریت تنظیمات چاپگر که شامل تولید مسیرهای حرکت نازل سه‌بعدی و تبدیل فایل فرمت STL مدل مورد چاپ به فایل G-code است، از نرم-افزارهای Ultimaker Cura نسخهٔ V4.12.1 و Simplify3D نسخهٔ V4.1.2 که جزو نرم‌افزارهای مدیریت تنظیمات چاپ FDM است، استفاده می‌شود. این نرم‌افزارها، فایل مدل سه‌بعدی مورد چاپ با فرمت STL را به‌صورت ورودی دریافت کرده و فایل با فرمت G-code[1] را که قابل‌شناسایی توسط کنترل چاپگر سه‌بعدی است، تولید می‌کند.

۳-۷- نرم‌افزار مدل‌سازی زی‌براش

فناوری‌های نوین سه‌بعدی درحال‌توسعهٔ روزافزون هستند؛ نرم‌افزارهایی مانندِ 3D Studio Max, Maya Zbrush, Lightwave و غیره. نرم‌افزارهای مدل‌سازی با نوآوری‌های مداوم در پالِت ابزارها و سیستم‌های رندر و وضوح هستند که جایگاه خود را در دنیا و در حوزهٔ علوم میراث فرهنگی پیدا کرده‌اند. در این بین Zbrush نرم‌افزاری است که در آن دست کاربر برای خلق هر نوع اثری کاملاً باز است و به او این امکان را می‌دهد که اثر مورد نظر را از طریق مدل‌سازی دیجیتالی خلق کند. هنگام بازسازی اثری در نرم‌افزار Zbrush باید دو نکتهٔ مهم در نظر گرفته شود: یکی سطح وضوحی که در نظر داریم نشان داده شود و دیگری، توانایی بازسازی از طریق تصاویر موجود. همان‌طور که گفته شد، ZBrush ابزاری بدون محدودیت و خلاقانه است؛ به همین دلیل استفاده از آن بسیار آسان است و درنهایت منجر به ساخت آثار هنری می‌شود. هیچ‌گونه محدودیتی در این نرم‌افزار وجود ندارد و اگر در خلق اثر کم و کاستی‌ای مشاهده می‌شود، به دلیل کم‌توانی هنرمندی است که قطعه را خلق می‌کند. به همین دلیل، بسیار مهم است که پیش از تصمیم به خلق اثر، طرحی از پیش تعیین شده داشته باشیم. ابزارهایی که هنگام

---

۱ . نام زبان برنامه‌نویسی اکثر ماشین ابزارهای کنترل عددی است.

شروع مجسمه‌سازی با ZBrush مورد استفاده قرار می‌گیرند Zspheres وTools هستند. با مدل‌سازی از طریق zspheres می‌توان انواع اشیاء و فیگورها اعم از انسان و حیوان را ایجاد کرد. Zspheres کره‌هایی هستند که به‌عنوان مَفصَل استفاده می‌شوند و نیمکره‌ها را به هم متصل می‌کنند. پس از ایجاد شکل اصلی، این کره‌ها متناسب با شکلی که در نظر داریم، به چندضلعی‌هایی با وضوح بالاتر یا پایین‌تر تبدیل می‌شوند. علاوه بر ZBrush ،zspheres دارای طیف گسترده‌ای از ابزار یا مدل‌هایی از قبل ایجادشده است که مدل‌سازی شخصیت‌ها، حیوانات و اشیای بی‌جان را تسهیل می‌کند. اشکال هندسی اصلی مانند مکعب‌ها، کره‌ها، مخروط‌ها یا استوانه‌ها در کتابخانهٔ ابزار برنامه ظاهر می‌شوند؛ به‌طوری‌که هنگام استفاده از آن‌ها می‌توان اصلاح و ترکیب‌شان کرد تا پایه‌ای برای مدلی که می‌خواهیم بسازیم، ایجاد شود (Pixologic Team, 2009).

۴-۷- چاپگر سه‌بعدی

از چاپگر سه‌بعدی برای ساخت نمونهٔ مدل‌سازی شده با مدل دستگاه Anet et5 pro ۲۰۲۰ ساخت کشور چین استفاده شد. روش کار این چاپگر مبتنی بر لایه‌گذاری مذاب یا FDM است که می‌تواند عملیات چاپ سه‌بعدی تا حداقل ضخامت لایهٔ ۱۰۰ میکرون (۰/۱ میلی‌متر) را انجام دهد؛ از مدل موجود دو نمونه چاپ به روش FDM گرفته شد که اطلاعات هرکدام به شرح زیر است:

۱-۴-۷- تنظیمات مربوط به قطعهٔ چاپ اول:

نازل چاپگر استفاده‌شده دارای قطر mm 4/0، ضخامت لایه‌گذاری: mm 12/0، درصد پر شوندگی: ۲۵٪، دمای چاپ: °C 205 و دمای هیت‌بد: °C 60، سرعت چاپ: mm2/s 40، زمان چاپ: ۷ ساعت، فیلامنت استفاده‌شده PLA[1] با برند Y.S به مقدار مصرفی g 26 است.

۲-۴-۷- تنظیمات مربوط به قطعهٔ چاپ دوم

نازل چاپگر استفاده‌شده دارای قطر ۰/mm 3 ، ضخامت لایه گذاری: ۰/mm 1 ، درصد پر شوندگی: ۲۵٪، دمای چاپ: °C 205 و دمای هیت‌بد: °C 60، سرعت چاپ: mm2/s 25، زمان چاپ ۱۴ ساعت، فیلامنت استفاده‌شده PLA با برند Y.S به مقدار مصرفی g 26 است.

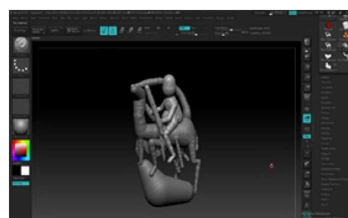
1- Polylactic acid

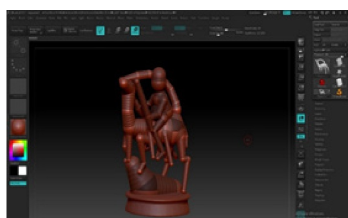
این چاپگر دارای سه محور آزاد است که در طول، عرض و ارتفاع درحرکت‌اند. چاپگر سه‌بعدی ابتدا مواد مصرفی را ذوب کرده و سپس این مواد از طریق نازل به‌صورت رشته‌های پلیمری ذوب‌شده در کنار هم قرار می‌گیرند و به هم متصل و در هم ادغام می‌شوند تا چاپ طرح مورد نظر لایه به لایه در محور Z به پایان برسد.

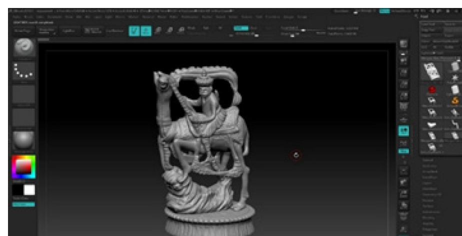
۸- روش انجام کار و نتایج حاصل از فرآیند بازسازی

۱-۸- مدل‌سازی اثر عاجی

ابتدا از تمامی جهت‌های اثر عکس‌برداری و مستندنگاری دقیق و با جزییات انجام می‌گیرد. البته سطح نورانی عاج کار مستندنگاری را با مشکل مواجه می‌کند که با کم و زیاد کردن نور و تغییر پس‌زمینه عکس‌های باکیفیت تهیه می‌شود. همان‌طور که در قسمت مطالعات بیان شده است با توجه به سطح براق عاج، جزییات بسیار پیچیده و زیاد اثر مورد مطالعه و همچنین اندازه کوچک آن با توجه به جزییات زیاد اثر، استفاده از تکنیک‌های سه‌بعدی مانند اسکنرهای نوری و لیزری و روش فوتوگرامتری را با مشکل مواجه می‌کند. باید روش‌های دیگری برای مدل‌سازی سه‌بعدی به کار رود. بهترین روش بعد از ابزارهای سه‌بعدی‌ساز، استفاده از نرم‌افزارهای سه‌بعدی است. در اینجا بازسازی اثر عاجی از نرم‌افزار Zbrush که نرم‌افزار تخصصی مجسمه‌سازی و حجاری سه‌بعدی است، استفاده شده است. مدل با توجه به عکس و زوایایی که از آن موجود بود با استفاده از Brushهای نرم‌افزار حجاری شد. برای حجاری ابتدا با استفاده از Zsphere یک ساختار کلی از مدل ساخته می‌شود (شکل ۱۰)، با استفاده از Adaptive Skin تبدیل به مش شده (شکل ۱۱) و بقیهٔ جزییات به‌صورت دستی و با قلم نوری اسکالپت می‌شوند (شکل ۱۲).

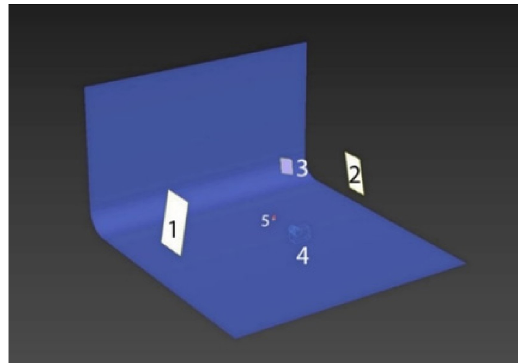

■ شکل ۱۰: حجاری ابتدایی با استفاده از Zsphere (مأخذ: نگارندگان).


■ شکل ۱۱: تبدیل به مش با استفاده از Adaptive Skin (مأخذ: نگارندگان).


■ شکل ۱۲: اضافه کردن جزییات به‌صورت دستی (مأخذ: نگارندگان).

۲-۸- رندر گرفتن از نمونه

بعد از مدل‌سازی از نمونه جهت نمایش رندر گرفته می‌شود. جهت انجام رندر، در برنامۀ زی‌براش فایل با فرمت FBX که فرمت خروجی رایج در اکثر نرم‌افزارهای 3D است، خروجی گرفته و وارد نرم‌افزار Autodesk 3ds Max که موتور رندر کرونا بر روی آن نصب‌شده بود، می‌شود. مهم‌ترین ویژگی موتور رندر کرونا کیفیت بالای آن، کوتاه‌بودن زمان لازم برای رندر گرفتن، سادگی و قابلیت Lightmix آن و همچنین پشتیبانی از متریال‌ها، نورها و دوربین‌های نرم‌افزار 3ds Max است. استودیوی شبیه‌سازی موتور رندر کرونا سه نور اصلی و یک پرده دارد (شکل۱۳) که تنظیمات آن برای رندر به این صورت است: نور اول سفیدرنگ با شدت Lux 107285، نور دوم سفیدرنگ و با شدت Lux 53642 و نور سوم با رنگ آبی آسمانی و شدت Lux 53642، نویز لول % 94/2، تناسب تصویر 8/0، رزولوشن 3750×3000، لنز دوربین focal 225 mm، زوم فکتور ۱، ایزو ۱۰۰، F-Stop:16 و تایم رندر 5:43 دقیقه‌ای از چهار نما رندر گرفته شده است (شکل۱۴).



■ شکل۱۳: استودیوی شبیه‌سازی موتور رندر کرونا: ۱- نور اول، ۲- نور دوم، ۳- نور سوم، ۴- دوربین، ۵- نمونه مورد مطالعه (مأخذ: نگارندگان).

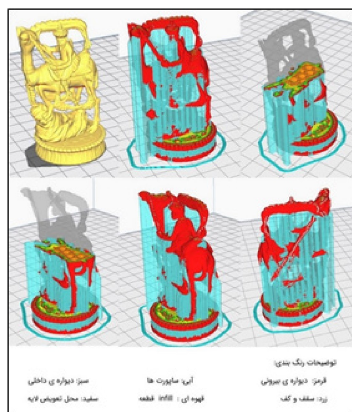

■ شکل۱۴: رندر از ۴ نمای مدل سه‌بعدی (مأخذ: نگارندگان).

۳-۸- چاپگر سه‌بعدی

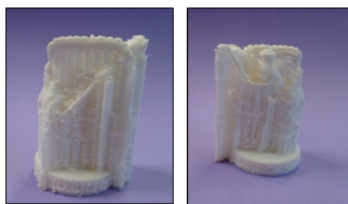
در چاپگرهای سه‌بعدی با فناوری FDM، اجسام به‌صورت لایه‌ای از مواد ترموپلاستیکِ ذوب‌شده، روی لایۀ قبلی ساخته می‌شوند. بنابراین برای اینکه لایه ساخته شود، باید لایۀ قبلی هم وجود داشته باشد تا مواد خروجی نازل بتوانند در جایی مستقر شوند. برای ساخت و چاپ یک مدل سه‌بعدی که دارای پیش‌آمدگی شیب‌دار و یا معلق باشد یا فرم قطعه زاویه‌ای کمتر از ۴۵ درجه داشته باشد، از ساپورت یا تکیه‌گاه استفاده می‌شود. ساپورت در چاپگرهای سه‌بعدی، به قسمت‌هایی اطلاق می‌شود که

چاپگر مجبور است لایه‌هایی را به‌عنوان پایه بسازد تا قسمت اصلی قطعه بر روی آن چاپ شود. اثر مورد مطالعه بعد از انجام مراحل مدل‌سازی سه‌بعدی که با فرمت STL خروجی گرفته‌شده بود، برای انجام مراحل چاپ در نرم‌افزار Cura جهت تبدیل به G-code اجرا شد (شکل۱۵).

با توجه به شکل ۱۵ میزان ساپورت، دیواره‌های داخلی و خارجی و میزان توپر بودن قطعه کاملاً قابل‌تشخیص است و طبق تنظیمات قطعه شمارۀ ۱ چاپگر سه‌بعدی، قطعۀ اول از مدل موجود پرینت گرفته شده است (شکل۱۶).



■ شکل۱۵: ساپورت گذاری در محیط نرم‌افزار Cura (مأخذ:نگارندگان).



■ شکل۱۶: قطعۀ اول، بعد از چاپ سه‌بعدی (مأخذ:نگارندگان).



■ شکل۱۷: نتیجۀ نهایی نمونۀ اول چاپ شده بعد از جداسازی ساپورت‌ها و آسیب به بدنۀ نمونۀ چاپ شده (مأخذ:نگارندگان).

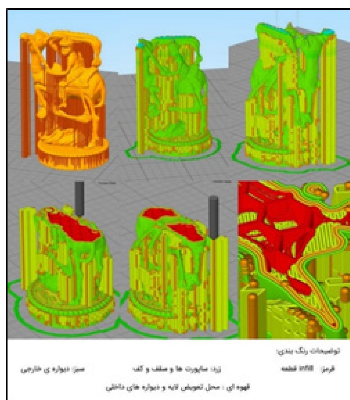
اولین اقدام پرداخت سطح در قطعات چاپ شده با چاپگر FDM جداسازی ساپورت‌ها است؛ البته حذف ساپورت‌ها به‌منزلۀ اتمام کار و افزایش سطح کیفیت قطعه نیست، بلکه بعد از عملیات حذف به سطح اصلی خواهیم رسید. معمولاً ساپورت‌ها را به دو روش از قطعه جدا می‌کنند؛ اولین روش، حذف مکانیکی است که در این مقاله نیز با این فرایند پیش رفته‌ایم، دومین روش قرار دادن قطعه در حلّال مناسب و حل شدن قسمت‌های ساپورت است. انجام دادن این کار باید با دو نوع نازل و فیلامنت مختلف صورت بگیرد. برای قسمت ساپورت‌گذاری معمولاً از فیلامنت‌هایی همچون HydroFill و PVA استفاده می‌شود. فناوری این روش و همچنین فیلامنت‌های ذکرشده برای استفاده درروند این مقاله، تا کنون در کشور موجود نبوده است.

ساپورت‌ها را می‌توان با فشار کم از بدنۀ قطعه جدا کرد. برای حذف ساپورت در قسمت‌هایی که دسترسی به آن‌ها محدود است یا بخش‌هایی ریز و ظریف دارند، از دم‌باریک و ابزارهای دندانپزشکی استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل۱۶ مشاهده می‌شود دورتادور اثر به دلیل فرم آن

ساپورت‌گذاری شده است. برای حذف ساپورت‌ها از ابزارهای مکانیکی همچون دم‌باریک و انبردست استفاده شده است. نوع ساپورت‌ها به‌گونه‌ای است که در قسمتی‌هایی به بخش ظریف بدنهٔ اصلی چسبیده و در حین جداسازی، به اثر نیز آسیب می‌رساند (شکل۱۷). لذا تصمیم گرفته شد که نمونهٔ دیگری با تنظیمات دقیق‌تر و در نرم‌افزار اسلایسر-Simpli fy3D چاپ شود. این نرم‌افزار نوعی نرم‌افزار مدیریت چاپگر سه‌بعدی است و ساپورت‌گذاری‌ها را به‌صورت هوشمندانه در زوایه‌های مورد نیاز قرار می‌دهد (شکل۱۸).

با تغییر قطر نازل از 4/0 mm به 3/0 mm و کم کردن مقدار ساپورت‌ها در نرم‌افزار Simplify3D ، این بار بعد از چاپ مدل سه‌بعدی کیفیت بهتری از مجسمه چاپ شد (شکل۱۹).

جداسازی ساپورت‌ها تا جایی که ممکن بود با فشار کم و به‌صورت دستی انجام شده است. برای بخش‌های حساس و ظریف ساپورت‌ها با نهایت دقت و با استفاده از تیغ بیستوری و قیچی حذف شده‌اند. پس از حذف کامل، آثار به جا مانده از وجود ساپورت‌ها، روی بدنهٔ اصلی قطعه باقی‌مانده بود که با استفاده از هیتر جت و با گرمای ملایم از بین رفتند (شکل۲۰).



■ شکل۱۸: ساپورت‌گذاری در نرم‌افزار Simplify۳D (مأخذ:نگارندگان).



■ شکل۱۹: نمونهٔ دوم بعد از چاپ سه‌بعدی (مأخذ:نگارندگان).



■ شکل۲۰: نتیجه نهایی (مأخذ: نگارندگان).

۹- بحث در یافته‌های تحقیق

استفاده از فناوری سه‌بعدی در حوزهٔ علوم میراث فرهنگی از قبیل باستان‌شناسی، موزه‌داری و مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی رو به رشد است. اما بررسی تمام وجوه آن از منظر مزایا و معایب بسیار ضروری است. در پی مطالعات صورت گرفته، چندین مورد به‌عنوان مشکلات اصلی مطرح شده‌اند که به هر یک از آن‌ها به‌اختصار اشاره شده است:

۱- حفظ پایداری اثر در دست مطالعه و کاهش درصد خطا در حین انجام کار.
۲- انجام مراحل به صورت روشمند و کمترین دخل و تصرف و لمس اثر مورد نظر.
۳- افزایش دقت و ظرافت در اجرای تزیینات، اشکال هندسی خاص و نامتقارن و نقوش احتمالی موجود که در اثر شکستگی از بین رفته‌اند.
۴- امکان اجرای چندین طرح پیشنهادی، اصلاح یا تکرار طرح در زمان کوتاه و درنهایت ارائۀ بهترین نمونه.
۵- بصرفه بودن از لحاظ زمان و هزینه نسبت به روش‌های سنتی.
۶- ایجاد عدم تعادل وزنی؛
۷- جلوگیری از اشتباهات رایج و ناخواستۀ مرمتگر در برابر اشیای حساس دارای اشکال ظریف و پیچیده همچون عاج.
۸- عدم نگرانی از برهم‌کنش‌های شیمیایی احتمالی موجود به دلیل بی‌اثر بودن مادۀ انتخابی و اتصال اجزای مختلف اثر با استفاده از رزین‌های برگشت‌پذیر و ایجاد لایۀ پرایمر در هنگام بازسازی قسمت‌های مفقودی اشیای تاریخی.
۹- میسّر بودن استفاده از منابع دیجیتال و نمایش به‌صورت سه‌بعدی در قالب نرم‌افزار یا ویدیوها در رسانه‌ها.

فناوری‌هایی که وارد رشته‌های خاص می‌شوند، دارای محدودیت‌هایی هستند. چاپگرهای سه‌بعدی همچون چاپگر FDM نیز در مرمت اشیای تاریخی-فرهنگی از این امر مستثنی نیستند. از مهمترین محدودیت‌ها، محدود بودن مواد در دسترس چه از نظر تنوع ماده (بافت و جنس) و چه از نظر رنگ‌بندی است. در جریان ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقود اشیای تاریخی، برای استخراج رنگ‌های خاص پاتین‌ها و تخریب‌های سطحی ناشی از تغییرات رنگی و مواردی مانند تبادل قلیایی، اگر اصرار به بازسازی مشابه با اثر تاریخی وجود داشته باشد، حتماً به رتوش‌کاری رنگی نیاز خواهد بود. همچنین می‌توان به خطاهای ابزاری حین اجرای مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپ آن اشاره کرد که در کیفیت محصول نهایی تأثیرگذار است.

فناوری چاپگر سه‌بعدی به روش FDM در مقایسه با سایر فناوری‌های چاپ سه‌بعدی دقت کمتری دارد. بنابراین نسبت به چاپگرهای دیگر برای نمونه‌سازی اشیای ظریف و با جزییات زیاد مناسب نیست ولی با تنظیمات دستی در نرم‌افزارهای مدیریت چاپ و با نازل‌های ۰٫۳ به پایین می‌توان کیفیت چاپ را بهبود بخشید. در اشیای نمونه‌سازی شده با چاپگر سه‌بعدی به روش فناوری FDM بخش‌هایی از

ساپورت نگهدارنده و خطوط لایه‌ای قابل مشاهده است، بنابراین برای رسیدن به یک سطح صاف نیاز به پرداخت دارد، همچنین مواد پلیمری مصرفی در چاپگرهای سه‌بعدی اگر برای مدت طولانی در معرض نور آفتاب قرار گیرند، به مرور زمان خواص مکانیکی و ویژگی‌های ظاهری آن‌ها ضعیف می‌شود؛ لذا برای ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقودی اشیاء در محیط موزه‌ای مناسب است. به‌دلیل ناشناخته بودن تقریبی این فناوری، تعداد افراد حاذق برای اجرای کار به‌ویژه در زمینهٔ حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی چندان زیاد نیست. انجام هرگونه اقدامات تکمیلی برای ساخت مولاژ و قسمت‌های مفقودی برروی نمونهٔ چاپ شده جهت مطابقت با بدنهٔ اشیاء نیز نیاز به مهارت دارد. در حقیقت مؤفقیت یک طرح در بازسازی قسمت مفقود و ساخت مولاژ با فناوری‌های نوین سه‌بعدی‌ساز، با فرآیندهای برداشت صحیح و دقیق شیء، طراحی و انجام عملیات تکمیلی بر روی داده‌های دیجیتالی به کمک نرم‌افزار تصویری سه‌بعدی‌ساز، انتخاب تجهیزات و مصالح مناسب، در کنار انجام تنظیمات دقیق و کنترل فرآیند چاپ سه‌بعدی و در نهایت عملیات اتصال و روتوش نهایی ارتباط مستقیمی دارد (رازانی و همکاران ۱۳۹۷). باتوجه به مزایا و محدودیت‌های ذکر شده و اقدامات انجام گرفته در این مقاله جهت ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقود اشیای حساس همچون عاج با چاپگر FDM و در مقایسه با روش‌های سنتی، می‌توان گفت این روش‌ها توانایی بسیار زیادی در مطالعات و پروژه‌های اشیاء موزه‌ای و اشیاء حساس تاریخی هنری همچون عاج و مجسمه‌های تاریخی-فرهنگی دارند.

۱۰- نتیجه‌گیری

امکان‌سنجی استفاده از فناوری‌های نوینِ سه‌بعدی جهت دستیابی به روش مناسب برای بازسازی قطعات مفقود و ساخت مولاژ با استفاده از تجهیزات موجود با کمترین دخالت ممکن از مهم‌ترین اهداف این پژوهش بوده است. با توجه به پیشرفت‌هایی که در زمینهٔ نمونه‌سازی سریع در صنعت اتفاق افتاده است و فراهم بودن این‌گونه فناوری‌ها در کشور، امروزه بستر مناسبی جهت ورود تجهیزات به علوم میراث فرهنگی پدید آمده است. در پژوهش حاضر با در نظر داشتن حجم زیاد مفقودی اثر و عدم سوار شدن قطعهٔ چاپ شده، با استفاده از روش بازسازی دیجیتال سه‌بعدی‌سازی با توجه به تصاویر موجود مدل‌سازی با نرم‌افزار زی‌براش و چاپ با چاپگر سه‌بعدی FDM جهت ساخت مولاژ تصمیم به ساخت مولاژ گرفته شد. یافته‌های پژوهش نیز نشان می‌دهد استفاده از تجهیزات سه‌بعدی در جهت نمونه‌سازی سریع می‌تواند برای بازسازی قسمت‌های مفقود و ساخت مولاژ از اشیای عاجی بسیار کارآمد و نتیجه‌بخش باشد. عملکرد این فناوری‌ها در مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی برای بازسازی قسمت‌های مفقود و ساخت مولاژ اشیای عاجی خلاصه نمی‌شود و می‌توان برای ساخت مولاژ از اشیاء، نقش‌برجسته‌ها و نقوش صخره‌ای، آثار ارزشمند تاریخی و همچنین بازسازی قسمت‌های مفقود آثار تخریب‌شده نظیر آثار فلزی، استخوان و شاخ، مروارید و صدف و جواهرآلات ارزشمند از این روش استفاده کرد. پیشنهادهایی که می‌توان برای مطالعات آینده داد، بررسی و ارزیابی فیلامنت‌های چاپگر FDM است و همچنین انتخاب بهترین ماده‌ای که سازگاری مناسب با اشیای دارای مفقودی و شرایط محیطی آن را داشته باشد. مطالعه در مورد چگونگی چسبندگی و به‌کارگیری مواد پلیمری بر روی آثار تاریخی از دیگر موارد پیشنهادی است.

۱۱- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب تشکر خود را از دانشگاه هنر اسلامی تبریز برای فراهم نمودن مراحل انجام تحقیق و از مؤسسهٔ فرهنگی موزه‌های بنیاد بدلیل در اختیار نهادن نمونه اثر عاجی و همچنین از سرکار خانم فاطمه صحتی، جناب آقای یاسین صدقی، مهندس کیهان عبداللّهی ماکویی و مهندس قیصری را دارند.

منابع

- آرشیو کاخ موزه سعد آباد، (بی‌تا)، « گزارش مرمت عاج‌های تزئینی کاخ موزه ملت»، گزارش کار.
- بهرام پور، شیما و کریمی، امیرحسن، (۱۳۹۵)، «کاربرد چاپگر سه‌بعدی در بازسازی اشیای تاریخی شیشه‌ای»، مرمت و معماری ایران، (۱۲)۶، ۱۱۵-۱۲۶.
- رازانی، مهدی، بخشنده فر، حمیدرضا، توکلی، اصغر و نصیرزاده، بهناز، (۱۳۸۹)، «نگاهی به جعل میراث فرهنگی در ایران»، مرمت و پژوهش دو فصلنامه مرمت اشیاء فرهنگی و بناهای تاریخی، (۸)۴، ۷-۲۲.
- رازانی، مهدی، حدادیان، محمدعلی و پورعباس، صفر، (۱۳۹۵)، «استفاده از فناوری های نمونه سازی سریع در بازسازی بخش های مفقود آثار شیشه ای با رویکرد استفاده در شیشه های تاریخی»، مرمت و معماری ایران، (۱۲) ۶، ۱۰۱-۸۵.
- رازانی، مهدی، حدادیان، محمدعلی و پورعباس، صفر، (۱۳۹۷)، «استفاده از فناوری های نوین نمونه سازی در بازسازی بخش های مفقود سفالینه های باستانشناسی»، پژوهش های باستان شناسی ایران، (۱۸)۸، ۱۹۳-۲۱۲.
- عبدالله خان گرجی، مهناز، (۱۴۰۰، تیر ۲۷)، «مصاحبه ای در رابطه با بازسازی گاو شاخدار از جنس عاج موجود در ویترین موزه ایران باستان»، (جلیل، اسمعیل نژاد تیمورآبادی، مصاحبه کننده).
- نیک نام، مهدی، (۱۳۹۰)، «بررسی ساختاری آثار عاج کنده کاری شده پیش از تاریخ، به منظور ارائه طریق حفاظت و مرمت»، کارشناسی ارشد، عبدالله‌خان گرجی، مهناز و حصاری، مرتضی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی. دانشکده هنر و معماری.
- نیکنامی، کمال‌لدین و میراشه، زهرا، (۱۳۸۴)، «استفاده از مدل های مجازی سه بعدی رایانه ای در بازسازی نیایشگاه ساسانی بندیان درگز»، پژوهش های باستان شناسی و مطالعات میان رشته ای، ۲۲-۳۰.

منابع لاتین

Alconada, B. (2017). Informe de Intervención de la escultura Cristo en la cruz perteneciente a la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando . Madrid: Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.
Antlej, K., Celec , K., Sinani, M., Mirtič , E., & Ljub, D. (2012). Restoration of a stemmed fruit bowl. Преглед НЦД, 21,141-146.
Arbace, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbri, M., Idelson, A., & Scopigno, R. (2012). Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. Journal of Cultural Heritage, 14(4), 332-345.
Baker, B., Jacobs, R., Mann, M., Espinoza, E., & Grein, G. (2020). Identification Guide for Ivory and Ivory Substitutes. Washington DC CITES Secretariat.
J. Barreau, T. Nicolas, G. Bruniaux, E. Petit, Q. Petit, Y. Bernard, R. Gaugne and V. Gouranton, (2014). Ceramics Fragments Digitization by Photogrammetry, Reconstructions and Applications, Computer Science, arXiv preprint arXiv:1412.1330.
Bisht, A. (2010). Conservation Of Textiles Bone and Ivory. New delhi Agam Kala Prakashan.
Chena, Y., Hana, X., Okadab, M., & Chenc, Y. (2008). Integrative 3D modelling of complex carving surface. Computer-Aided Design, 40(1), 123-132.
Chu, Y., Meyers, M., Wang, B., Yang, W., Jung, J., & Coimbra, C. (2015). A Sustainable Substitute for Ivory: the Jarina Seed from the Amazon. Scientific Reports, 5(1), 1437.
Cui, F., Wen, H., Zhang, H., MA, C., & Li, H. (1994). Nanophase hydroxyapatite-like crystallites in natural ivory. materials science letters, 13, 1042-1044.
Espinoza, E., & Mann, M. (1993). The history and significance of the Schreger pattern in proboscidean ivory characterization. Journal of the American Institute for Conservation, 32(3), 241-248.
Fantini, M., Crescenzio, F., Persiani, F., Benazzi, S., & Gruppioni, G. (2008). 3D restitution, restoration and prototyping of a medieval damaged skull. Rapid Prototyping Journal, 14(5), 318-324.
Koska, B. (2011). Using unusual technologies combination for madonna statue replication. Geoinformatics, 6, 220- 227.
Lin, T., Chang, H., & Hu, S. (2013). 3D Reconstruction of Intricate Objects using Planar Cast Shadows. In ACM SIGGRAPH 2013 Posters, pp.1-1.
Locke, M. (2013). Bone, Ivory, and Horn: Identifying Natural Materials. Atglen, Pennsylvania, United States Schiffer.

Locke, M, (2008), Structure of ivory, Morphology, 269 (4), 423-450.
Marroquim, R., Sá, A., Rodrigues, K., Balbio, V., and Zamorano, R. (2017). Digitising Ivory Artefacts at the National History Museum in Brazil. EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage, 11-18.
Museo Arqueológico Nacional. (2018, September 7). Retrieved from http://www.man.es/man/coleccion/ultimas-restauraciones/figura-marfil.html
Owen, R. (1856). Ivory and the teeth of commerce. Journal of the Royal Society, 5, 65-71.
Pixologic Team. (2009, 01 15). Retrieved 05 03, 2010, from [online] http://www.pixologic.com/zbrush/downloadcenter/
Rocchini, C., Cignoni, P., Montani, C., & Pingi, P. (2011). 3D Scanning the Minerva of Arezzo. Ichim, 2, 1-5.
Robert, B, and Faltermeier, (2014), An Easy Guide to Care for Sculpture and Antique Art Collections, In Ivory, Bone and Related Materials, by I.M Godfrey, 55-59. Switzerland Springer, Cham.
Schilling, R., Jastram, B., Wings, O., Schwarz-Wings, D., & Issever , A. (2013). Reviving the Dinosaur: Virtual Reconstruction and Three-dimensional Printing of a Dinosaur Vertebra. Radiology, 270(3), 864-871.
Scopigno, R., Callieri, M., Cignoni, P., Corsini, M., Dellepiane, M., Ponchio, F., & Ranzuglia, G. (2011). 3D Models for Cultural Heritage: Beyond Plain Visualization. 44(7), 48-55.
Spencer, S. (2008). ZBrush Character Creation: Advanced Digital Sculpting. Indianapolis: Wiley Publishing Inc.
Stiles, D. (2004). The ivory trade and elephant conservation. Environmental Conservation, 31(4), 309-321.
Styliani, S., Fotis, F., Kostas, K., & Petros, P. (2009). Virtual museums, a survey and some issues for consideration. Journal of Cultural Heritage, 10(4), 520-528.